

# 生态保护领域的跨学科野外数据集成监测研究进展

梁友嘉<sup>1\*</sup>, 刘丽珺<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>长江大学资源与环境学院, 湖北 武汉

<sup>3</sup>武汉理工大学航运学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2021年9月20日; 录用日期: 2021年10月21日; 发布日期: 2021年10月28日

## 摘要

面向生态环境保护的野外数据集成监测正成为地理学、生态学等学科交叉领域的研究热点, 集成监测技术有助于提高多时空尺度的生态系统“格局-过程-功能”研究和生态保护水平。以文献计量分析为基础, 综述遥感、地面部署和数据融合等代表性野外监测技术在生态环境保护领域的应用, 并总结多源数据采集和集成管理方法。发现: 1) 多数监测技术具有开源和低成本特征, 满足监测的经济性和可推广性的应用需求; 2) 多尺度、长时序的野外数据监测和分析对认识生态系统多种胁迫因素及复杂反馈机制起到支撑作用, 有助于促进特定尺度的科学新认识和生态系统集成管理。

## 关键词

集成监测技术, 遥感, 生态保护, 跨学科

# Integrated Monitoring for Field Data of Interdisciplinary Eco-Environmental Protection

Youjia Liang<sup>1\*</sup>, Lijun Liu<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan Hubei

<sup>3</sup>School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

Received: Sep. 20<sup>th</sup>, 2021; accepted: Oct. 21<sup>st</sup>, 2021; published: Oct. 28<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

## Abstract

Based on the target of ecological environment protection, the integrated monitoring technology of field data is becoming a hotspot in interdisciplinary fields such as geography and ecology. Integrated monitoring technology can help us to improve the research level in the field of ecosystems “pattern-process-function” at multiple spatiotemporal scales, also including relative strategies of eco-environmental protection. This paper reviews the application of monitoring techniques in the field of eco-environmental protection based on bibliometric analysis, such as remote sensing, ground deployment and data fusion, and then analyzes the corresponding multi-source data acquisition and integrated management methods. The results show that: 1) Most of the monitoring techniques have the characteristics of open source and low cost, which can meet the needs of economic and extensible technology; and 2) Monitoring and analysis of multi-scales and long-term field data have important factors to understand the ecosystem and the relative complex feedback mechanism. The integrated technologies also can promote the role of science, help to form a new scientific awareness and interdisciplinary environmental strategies at specific spatial and temporal scale, as well as integrated ecosystem management.

## Keywords

Integrated Monitoring Technology, Remote Sensing, Eco-Environmental Protection, Inter-Disciplines

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

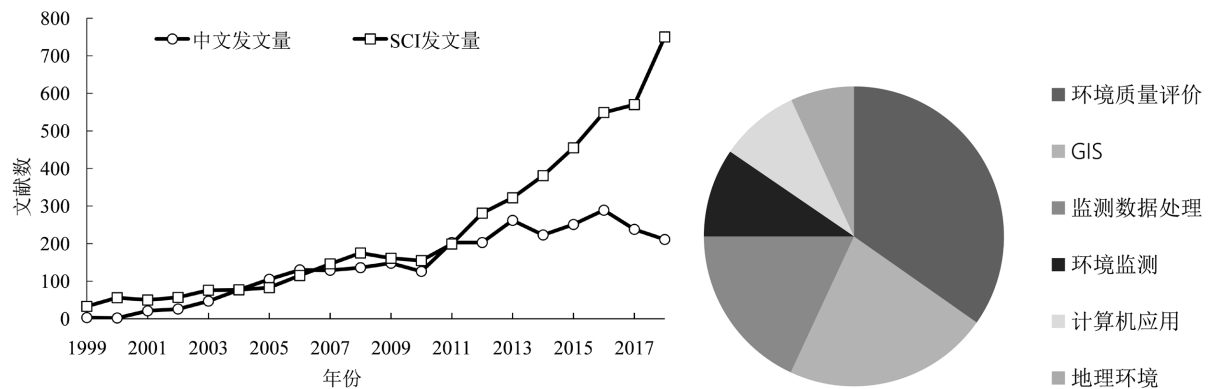


Open Access

## 1. 引言

中国社会对生态文明建设的认识正不断深化, 生态环境状况持续好转, 生态保护相关的跨学科野外数据监测正进入新的历史发展时期[1] [2]。野外数据集成监测为多尺度生态保护研究提供了新数据和新方法[3], 已在生物多样性损失、气候变化、非法捕猎贸易、水资源管理等领域快速应用[4] [5], 为环境调查执法和政府管理决策等应用需求提供决策辅助。集成监测弥补了传统野外调查和采样方法中站点布设耗时、维护费用昂贵等缺点, 有效改进了偏远地区动态监测困难等问题[6]。本文通过综述数据监测技术在生态保护领域应用的优势和挑战, 分析跨学科野外数据监测的潜在发展趋势。

跨学科野外数据集成监测领域总体发文量在快速增加。选择 Web of Science 核心数据库和 CNKI 数据库, 分别检索(“ecosystem” OR “environment”) AND (“monitor” OR “observe”) AND (“integrated” OR “integrate” OR “integration”) AND (“data”)和(“生态系统” OR “环境”) AND (“监测” OR “观测”) AND (“集成” OR “综合”) AND (“数据”), 类型覆盖“题名”、“关键词”和“摘要”等, 时间为 1999~2018 年。SCI 论文为 4691 篇, 自 2010 年起快速增加, 中文核心论文为 2830 篇, 发文量缓慢稳增, 少于同期 SCI 论文(图 1)。高频关键词有环境质量评价(34.8%)、GIS (22.05%)和监测数据处理(18.11%)等, 表明野外数据集成监测领域关注环境质量评估的核心主题, 重视 3S 和数据处理等技术集成。综述 3 类代表性技术方法的研究进展, 为跨学科野外数据集成监测发展提供科学参考和技术支持。



**Figure 1.** The number change of papers in integrated monitoring for the interdisciplinary field data  
**图 1.** 跨学科野外数据集成监测领域的文献数量变化

## 2. 遥感技术

### 2.1. 卫星遥感

卫星遥感能实现大范围地理空间覆盖, 适用于长时序生态环境监测。根据使用成本可分为公益性和商业性卫星。政府资助的公益性遥感卫星通常可提供较长时间序列的开源观测数据, 如 1972 年启动的 Landsat 计划为跨学科生态监测提供了数据支持[7], 光学多光谱传感器和主动式传感器(如雷达)产品在植被动态、气候/天气模式和生态系统生理参数(如土壤湿度)等领域得到应用[8] [9] [10]; 商业性卫星光谱信息丰富(至少 4~8 个波段的光谱合成), 适用于植被动态和可视化分析等高精度监测领域, 但产品价格限制了其快速推广[11]; 小卫星(CubeSat, 重约 1~10 kg, 体积 1000 cm<sup>3</sup>左右)研发维护费用低廉, 近年来迅速投放到更低地球轨道以实现大范围覆盖, 为野外数据监测提供新技术支撑[12]。如 Planet 公司小卫星观测网络可提供天尺度分辨率 < 5 m 的全球影像, 欧洲航天局依托欧盟第七框架计划发起多国参与的小卫星大气低层探测 QB50 计划; 最后, 影像数据集成处理技术为用户差异化定制提供了新机遇。如 Google Earth Engine (GEE) 云服务系统能提供影像存档和搜索功能, 实现了数据预处理、信息提取和产品(如植被指数和土地利用图)生产[13]。

### 2.2. 机载遥感

机载遥感(Airborne Remote Sensing)正成为连接样地监测和大尺度卫星观测的中高空间分辨率精细化监测技术, 适用于获取种群生物物理特征和特定生态系统信息[14] [15]。机载遥感为“样地 - 景观 - 区域”跨尺度集成监测提供了新手段, 在农业和林业领域应用广泛[16], 具体包括: 数字照片抓拍、高保真高光谱影像获取、主动式雷达和激光探测等[17] [18] [19] [20]。如卡内基机载天文台分类制图系统(Carnegie Airborne Observatory Airborne Taxonomic Mapping System)能融合 2 个光学高光谱成像仪和 1 个波形激光探测与测量扫描仪(Waveform Light Detection and Ranging Scanner)的遥感数据, 适用于分析森林冠层特征和碳储存[21], 相应的专题数据集也不断更新, 如温带生态系统监测数据集。

### 2.3. 无人机系统

无人机系统(Unmanned Aircraft Systems, UAS)搭载高精度导航系统, 在小尺度生态环境监测、动植物栖息地制图及景观分析等领域发展迅速[22] [23]。UAS 可沿预定导航路线点航拍摄感兴趣区域(图 2), 能获得高分辨率的多源产品, 包括相片、视频、热图像、多波段影像、高光谱和 LiDAR 影像等[24] [25]。例如, 在动物栖息地监测中, UAS 通过超高频(Ultra High Frequency, UHF)或无线射频识别(Radio Frequency

Identification, RFD)精确监测动物栖息地变化[26]; 偏远地区生态监测中, UAS 可以快速获取较高精度的制图数据, 影像地理范围误差一般小于 2 m [27]。UAS 应用主要受人力成本、计算机软/硬件费用、维护和技术指导等因素影响。日益便捷的 UAS 技术正在生态系统过程监测、植被资源调查和野生动物保护等方面发挥重要作用。



**Figure 2.** Images of field monitoring tools ((A) Fixed-wing UAS; (B) Multirotor UAS; (C) SPADE probe)  
**图 2.** 野外作业中常用监测工具((A) 固定翼无人机; (B) 多旋翼无人机; (C) SPADE 探头)

### 3. 地面部署技术

#### 3.1. 全球定位系统遥测

全球定位系统(Global Positioning Systems, GPS)通过与示踪技术结合, 可用于监测动物寻找资源或规避风险过程[28]、生态系统服务(如营养物扩散)过程[29]、动物疾病传染和风险扩散路径[30]等。相关监测为生态廊道维持和生态设计提供了数据支持, 也为不同破碎度的斑块连接提供了景观生态学证据[31]。遥测技术正由早期 30~300 MHz 甚高频无线电向全面收集种群生理参数和环境数据的方向发展[32] [33]。如, 通过内嵌加速计标记, GPS 用于测量动物微尺度移动轨迹、心律和体温等生理参数, 为分析动物能量消耗行为提供支持[34]; GPS 还能方便地用于偏远地区农业耕作监测, 如远程分布式深松作业监测数据可有效提高深松作业监测效率[35]。监测数据尺度与监测目标不完全匹配、数据响应速度慢和定位精度等是 GPS 应用面临的主要挑战。通过改进数据质量和集成遥感数据, GPS 遥测正成为大范围、持续性生态环境监测的重要技术。

#### 3.2. 相机触发

相机触发技术通过标记时间的照片收集特定时空范围的动物移动数据, 可远程获取相对无偏的样本数据, 在多样性快速评估和非法捕猎监测等领域广泛应用[36]。如遥控式红外触发式相机通过连拍模式记录要素变化, 数据存储容量大, 受地形和栖息地影响较小, 在监测标记物种数量、年龄、繁殖过程等精确参数时技术优势明显[37]。相机选择时一般包括探测角度和距离、视场、触发速度、恢复时间、价格和分辨率等因素[38]。分析动物移动范围、栖息地偏好和估计种群规模时一般采用多类型相机矩阵[39] [40]; 相机触发还与区域通讯网络集成, 以短讯服务(Short Messaging Service, SMS)或多媒体短信服务(Multimedia Messaging Service, MMS)方式实时传送影像/视频[41] [42]。相机触发技术为生态监测提供了丰富的数据和预警信息, 有助于提高决策效率, 应用前景良好。

#### 3.3. 无线传感器网络

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)由相互独立监测的分布式传感器组成, 探测非侵入模式下观测目标和生境参数变化, 数据存储量大且采样频率高[43]。WSN 通过集成开源微处理器(如 Arduino)、大容量存储卡和低成本传感器, 利用独立传感器节点和无线电传输器与网络中心交互, 可用于

监测冰川变化、土壤水热变化、树木生长、径流变化和动物种群迁移等[44]。在复杂地形多要素监测中,从末端数据采集到汇聚的 WSN 拓扑结构可依次设为观测节点、中继节点和汇聚节点[45]。观测节点是连接传感器(如 SPADE 探头,集成了土壤水分和土壤温度 2 种传感器)的基本测量单元,通过使用短距离、低功耗的无线通讯传输协议(如 Jennic Zigbee 协议栈等)将多要素观测数据定时发送至中继节点;后者再将数据定时发送到汇聚节点,并利用通用分组无线服务技术(General Packet Radio Service, GPRS)发送至远程接收端,完成室内数据分析和分发(图 3)。WSN 研究难点是传感器网络稳定性和集成传感器研发,通过集成多目标监测需求、低功耗器件、计算机软硬件和连接设备等,WSN 已成为非侵入式多要素监测的新技术,存在与决策辅助系统集成可能性。

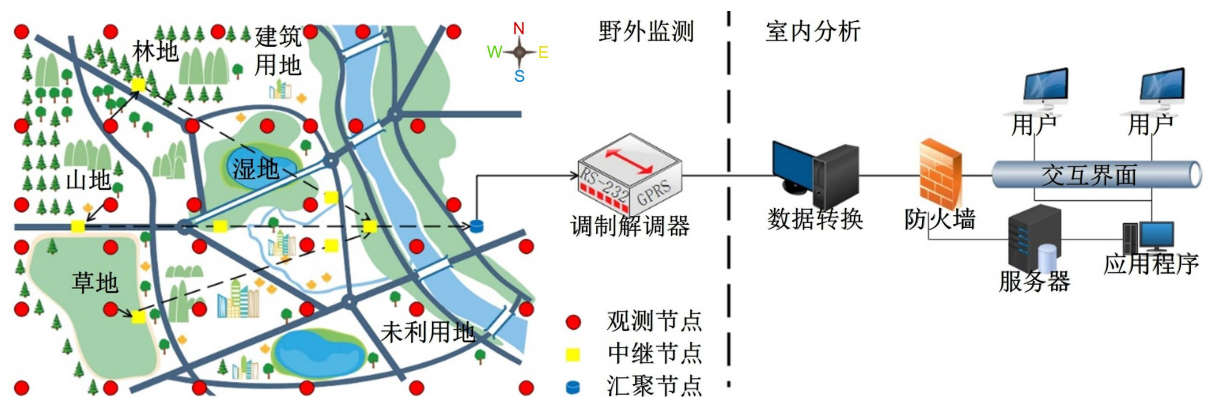


Figure 3. Conceptual framework of WSN monitoring for multiple elements in complex topography  
图 3. 复杂地形下多要素 WSN 监测分析概念框架

## 4. 野外数据监测的集成途径

### 4.1. 数据分析技术集成

移动端设备和相关应用程序正成为数据分析的重要工具,在野外数据记录、动态查看和分析等方面应用迅速。移动设备野外作业成本低于卫星导航设备,且无需严格考虑防水或耐震等特殊要求,但精度仍待提高[46];开源跨平台程序较好地弥补了移动设备数据处理的局限性:GIS 程序能调用和加载多源影像/地图,创建矢量数据和带位置信息的图片库,有曲线学习功能(如 iGIS, WolfGIS 和 iGeoTrack);还有种群鉴定工具(如“形色”、Plant-o-Matic 和 Map of Life)、天气和环境条件监测(如 Marine Weather Plus 和 RiverFlows)、集成传感器的植被含水量监测和分子鉴定工具(如 SCiO)和野外科普教育与知识传播(如 iNaturalist)程序;开源应用程序正在大幅提高生态环境监测效率和生产力[47]。

在生态环境监测数据处理方面,R 和 Python 等大数据处理工具正在快速应用。如 R 编程简单且能定制地理数据软件包(raster 和 rgdal, <https://cran.r-project.org/>);Python 数据运算快且存储管理方便(<https://www.python.org/>),通过调用 GDAL(Geospatial Data Abstraction Library)软件包显著提高了地理大数据多维变量关系的分析效率[48];开源平台集成多种并行计算的机器学习算法(如 H<sub>2</sub>O, <https://www.h2o.ai/>),可用于快速提高生态数据计算效率。

### 4.2. 数据管理工具集成

集成管理工具能有效弥补传统方式在应对生态资源破坏时的缺陷[49]。如保护区资源调查通过传统的表格纸记录、移动设备、GPS、相机和专业仪器等获取数据。空间监测和报告工具(Spatial Monitoring and Reporting Tool, SMART)能快速集成多源数据和评估不同管理方案(<http://smartconservationtools.org/>),包括

调查过程、数据输入、制图与分析、反馈与评估和情景规划 5 个模块; 其应用流程是先利用移动设备记录、上传和管理调查数据, 再根据调查路线、栖息地特征及自定义需求设定模型, 输出空间化数据和分析报告, 并将信息以可选方式发送给用户, 完成管理优化; SMART 可与多尺度遥感产品集成, 如调用 Landsat 数据监测区域森林变化; 集成 UAS 率影像用于小尺度森林监测, 为森林管理提供数据。类似工具有火情资源管理系统(Fire Information for Resource Management System, FIRMS), 已用于林木保护区砍伐和火灾实时监测[50]。

### 4.3. 长时序野外监测数据集生产

长时序数据集是生态格局 - 过程 - 功能研究的主要数据源, 受空间尺度、采集频率或时间等因素影响。例如, 利用机载雷达生成森林冠层三维结构和复杂地形的高精度数字高程模型[51]; 利用 UAS 精细监测森林冠层、树种鉴别和林木物候等生态要素[52]; 利用 GPS 和 WSN 网络创建精细矢量/栅格数据集, 为遥感影像提供相似时空尺度的验证资料[53]。通过集成现有技术优势和降低成本, 为要素分布式监测以及跨平台、跨尺度的多源数据集生产提供了长时序的技术支持。

#### 4.3.1. 多尺度遥感数据集成

获取多源的空天地遥感数据, 深度集成遥感数据信息, 以地物目标的影像物理特性为基础, 分析多源数据之间的内在规律性; 将像素层、特征层和决策层进行多层次融合, 与行业模型集成以提取有价值信息。具体集成方向是: 1) 遥感数据预处理方法集成, 如集成影像辐射定标、大气校正、几何校正等常规方法和多源异构数据的协同精确校正方法; 2) 数据空间融合方法集成, 如利用摄影测量和图像计算机处理法, 将空间融合转换为数据联合区域网平差和图像配准问题; 3) 数据信息融合方法集成, 获取像素级、特征级和决策级的数据新信息, 如多源数据联合区域网平差方法、多层次深度信息融合技术、深度神经网络和信息提取技术等[54]。

#### 4.3.2. 多时空大数据动态集成

各类传感器正在产生海量的野外监测时空大数据, 具有多平台、多传感器、多类型、多时空分辨率、多光谱等数据特征, 自动发现和提取隐含模式、规则及知识是大数据时空动态集成的关键和难点。主要研究方向可能有: 地理时空大数据的可视化表达、度量、解释的基础理论和方法; 揭示时空大数据与现实研究对象、生态过程、环境事件等互馈要素的相互作用规律; 利用集成方法对监测目标和人类活动进行地理时空数据自动采集、信息提取、知识认知和智能管理服务, 是典型的多学科交叉研究领域。

### 4.4. 跨学科的生态环境保护新视角

大规模人类活动导致全球景观日益破碎化, 如森林砍伐、过度开垦、水资源超采等活动引起生态系统连锁效应, 严重干扰生态系统健康与稳定性, 甚至导致物种灭绝与生物多样性退化。多源野外数据监测发现, 复杂生态系统之间具有连通性, 通过增加景观连通性能实现重新连接生境斑块或保护现有生态系统连通性; 数据集成监测还支持现存的生物多样性保护, 并对关联生态系统产生整体性保护效果; 监测数据集促成促使利益相关者从国际层面开展跨国界的生态环境保护计划, 对海洋保护区和野生动物栖息地保护等领域有重要作用, 数据集成结果将直接用于获取解决自然景观分散的问题, 促进集成分析和环保应用发展。

## 5. 结论

综述表明, 野外数据集成监测以集成多源遥感数据和提取目标特征为基础, 存在如下研究热点: 1) 遥感数据高精度预处理, 如常规定标和校正处理优化、多源异构数据的协同精确校正等; 2) 多源数据融合技术, 如基于联合区域网平差和基于图像配准的空间融合方法, 针对统一地理坐标的多源信息融合;

3) 地理时空大数据案例开发, 获取多平台、多时相、多传感器类型、高分辨率和海量的多源地理时空大数据, 开发基于大数据的自动发现和隐含信息提取模式、规则及知识, 提高人们认知空间的能力。现有监测新技术多具有低成本、低投资和布设周期快等特征, 有利于快速开展野外监测, 同时也存在局限性。例如, 高分辨率卫星传感器价格贵且难以普及; UAS 的电源、载荷及飞行时空范围受限, 且所需的专业操作知识要求高; 新技术人工培训费可能会高于设备布设费用等。同时, 传统人工调查方法在植被种群鉴别、植被生物物理参数监测、土壤采样等领域仍起主导作用。

本文介绍了多尺度监测和数据集成技术, 为提高跨学科野外数据融合及监测效率、开展空间显式的数据分析和预测提供参考; 低成本、大众化的集成监测技术正成为跨学科研究新方向, 为更全面的生态环境监测提供技术支持; 发展相关技术需要生态学、自然地理学、地理信息科学和生态系统管理等跨学科利益相关者共同参与和合作。

## 致 谢

感谢审稿专家的宝贵意见。

## 参考文献

- [1] 文洪朝. 跨学科研究——当今科学发展的显著特征[J]. 西北工业大学学报: 社会科学版, 2007, 27(2): 12-16.
- [2] 刘畅, 冯宝平, 张展羽, 等. 基于压力-状态-响应的熵权-物元水生态文明评价模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 1-7.
- [3] Pimm, S.L., Jenkins, C.N., Abell, R., *et al.* (2014) The Biodiversity of Species and Their Rates of Extinction, Distribution, and Protection. *Science*, **344**, Article ID: 1246752. <https://doi.org/10.1126/science.1246752>
- [4] Milner-Gulland, E.J. and Bennett, E.L. (2003) Wild Meat: The Bigger Picture. *Trends in Ecology & Evolution*, **18**, 351-357. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00123-X](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00123-X)
- [5] IPCC (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- [6] Marvin, D.C., Asner, G.P. and Schnitzer, S.A. (2016) Liana Canopy Cover Mapped throughout a Tropical Forest with High-Fidelity Imaging Spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, **176**, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.028>
- [7] 汤冬梅, 樊辉, 张瑶. Landsat 时序变化检测综述[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(8): 1069-1079.
- [8] Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., *et al.* (2018) A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, **56**, 79-107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>
- [9] 冯琦胜, 殷建鹏, 杨淑霞, 等. 草层高度遥感监测研究进展[J]. 草业科学, 2018, 35(5): 1040-1046.
- [10] 雷倩, 李金亚, 马克明. 遥感技术在鸟类生态学研究中的应用[J]. 生物多样性, 2018, 26(8): 862-877.
- [11] 韩昌元. 近代高分辨地球成像商业卫星[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(3): 201-208.
- [12] Poghosyan, A. and Golkar, A. (2017) CubeSat Evolution: Analyzing CubeSat Capabilities for Conducting Science Missions. *Progress in Aerospace Sciences*, **88**, 59-83. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.11.002>
- [13] Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., *et al.* (2017) Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*, **5**, 17. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00017>
- [14] Guy-Haim, T., Lyons, D.A., Kotta, J., *et al.* (2018) Diverse Effects of Invasive Ecosystem Engineers on Marine Biodiversity and Ecosystem Functions: A Global Review and Meta-Analysis. *Global Change Biology*, **24**, 906-924. <https://doi.org/10.1111/gcb.14007>
- [15] 闫海明, 战金艳, 张韬. 生态系统恢复力研究进展综述[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3): 303-314.
- [16] 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247-260.
- [17] 周梦维, 柳钦火, 刘强, 等. 机载激光雷达的作物叶面积指数定量反演[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 207-213.
- [18] 李冰, 刘镛源, 刘素红, 等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13):

- 160-165.
- [19] 庞勇, 李增元, 陈尔学, 等. 激光雷达技术及其在林业上的应用[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 129-136.
- [20] Bégué, A., Arvor, D., Bellon, B., *et al.* (2018) Remote Sensing and Cropping Practices: A Review. *Remote Sensing*, **10**, 99. <https://doi.org/10.3390/rs10010099>
- [21] Dahlin, K.M., Asner, G.P. and Field, C.B. (2013) Environmental and Community Controls on Plant Canopy Chemistry in a Mediterranean-Type Ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**, 6895-6900. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215513110>
- [22] Koh, L.P. and Wich, S.A. (2012) Dawn of Drone Ecology: Low-Cost Autonomous Aerial Vehicles for Conservation. *Tropical Conservation Science*, **5**, 121-132. <https://doi.org/10.1177/194008291200500202>
- [23] 孙中宇, 陈燕乔, 杨龙, 等. 轻小型无人机低空遥感及其在生态学中的应用进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 528-536.
- [24] Anderson, K. and Gaston, K.J. (2013) Lightweight Unmanned Aerial Vehicles Will Revolutionize Spatial Ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **11**, 138-146. <https://doi.org/10.1890/120150>
- [25] Watts, A.C., Ambrosia, V.G. and Hinkley, E.A. (2012) Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing*, **4**, 1671-1692. <https://doi.org/10.3390/rs4061671>
- [26] 郭新磊, 宜树华, 秦彧, 等. 基于无人机的青藏高原鼠兔潜在栖息地环境初步研究[J]. 草业科学, 2017, 34(6): 1306-1313.
- [27] 何敬, 李永树, 徐京华, 等. 无人机影像制作大比例尺地形图试验分析[J]. 测绘通报, 2009(8): 24-27.
- [28] 吴庆明, 杨宇博, 邹红菲, 等. 扎龙保护区春季丹顶鹤觅食的农田生境利用分析[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3212-3217.
- [29] Côrtes, M.C. and Uriarte, M. (2012) Integrating Frugivory and Animal Movement: A Review of the Evidence and Implications for Scaling Seed Dispersal. *Biological Reviews*, **88**, 255-272. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2012.00250.x>
- [30] Altizer, S., Bartel, R. and Han, B.A. (2011) Animal Migration and Infectious Disease Risk. *Science*, **331**, 296-302. <https://doi.org/10.1126/science.1194694>
- [31] Mueller, T., Lenz, J., Caprano, T., *et al.* (2014) Large Frugivorous Birds Facilitate Functional Connectivity of Fragmented Landscapes. *Journal of Applied Ecology*, **51**, 684-692. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12247>
- [32] Kays, R., Crofoot, M.C., Jetz, W., *et al.* (2015) Terrestrial Animal Tracking as an Eye on Life and Planet. *Science*, **348**, aaa2478. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12247>
- [33] 何可, 杨志松, 青菁, 等. 大熊猫 GPS 项圈行为数据的分类阈值[J]. 动物学杂志, 2016, 51(2):169-175.
- [34] Williams, T.M., Wolfe, L., Davis, T., *et al.* (2014) Mammalian Energetics. Instantaneous Energetics of Puma Kills Reveal Advantage of Felid Sneak Attacks. *Science*, **346**, 81.
- [35] 赵世卿, 吴永峰, 李光林, 等. 丘陵山区农机深松作业深度和面积远程监测系统[J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2018(12): 5.
- [36] 何百锁, 孙瑞谦, 陈鹏, 等. 基于红外相机技术调查长青国家级自然保护区兽类和鸟类多样性[J]. 兽类学报, 2016, 36(3): 348-356.
- [37] 李斌强, 李鹏映, 杨家伟, 等. 运用红外相机调查云南巍山青华绿孔雀自然保护区的鸟兽多样性[J]. 生物多样性, 2018, 26(12): 1343-1347.
- [38] Trollet, F., Vermeulen, C., Huynen, M.C., *et al.* (2014) Use of Camera Traps for Wildlife Studies: A Review. *Biotechnology Agronomie Societe et Environnement*, **18**, 446-454.
- [39] Burton, A.C., Neilson, E., Moreira, D., *et al.* (2015) Review: Wildlife Camera Trapping: A Review and Recommendations for Linking Surveys to Ecological Processes. *Journal of Applied Ecology*, **52**, 675-685. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12432>
- [40] 张履冰, 崔绍朋, 黄元骏, 等. 红外相机技术在我国野生动物监测中的应用: 问题与限制[J]. 生物多样性, 2014, 22(6): 696-703.
- [41] 翟佳, 袁凤辉, 吴家兵. 植物物候变化研究进展[J]. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3237-3243.
- [42] Pender, R.J., Shiels, A.B., Bialic-Murphy, L., *et al.* (2013) Large-Scale Rodent Control Reduces Pre- and Post-Dispersal Seed Predation of the Endangered Hawaiian Lobeliad, *Cyanea superba* subsp. *superba* (Campanulaceae). *Biological Invasions*, **15**, 213-223. <https://doi.org/10.1007/s10530-012-0280-3>
- [43] 宫鹏. 无线传感器网络技术环境应用进展[J]. 遥感学报, 2010, 14(2): 387-395.



- 
- [44] 吴阿丹, 郭建文, 李建轩, 等. 基于 Web 的黑河流域生态水文 WSN 自动观测数据可视化系统应用研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(3): 416-422.
- [45] Jin, R., Li, X., Yan, B.P., *et al.* (2014) A Nested Eco-Hydrological Wireless Sensor Network for Capturing Surface Heterogeneity in the Middle-Reach of Heihe River Basin, China. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **11**, 2015-2019. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2319085>
- [46] Davies, A.B. and Asner, G.P. (2014) Advances in Animal Ecology from 3D-LiDAR Ecosystem Mapping. *Trends in Ecology & Evolution*, **29**, 681-691. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.10.005>
- [47] Teacher, A.G.F., Griffiths, D.J., Hodgson, D.J., *et al.* (2013) Smartphones in Ecology and Evolution: A Guide for the App-Rehensive. *Ecology & Evolution*, **3**, 5268-5278. <https://doi.org/10.1002/ece3.888>
- [48] 乔慧捷, 胡军华, 黄继红. 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战[J]. 中国科学: 生命科学, 2013, 43(11): 915-927.
- [49] 朱教君, 闫巧玲, 于立忠, 等. 根植森林生态研究与试验示范, 支撑东北森林生态保护恢复与可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2018(1): 15.
- [50] Davies, D.K., Ilavajhala, S., Wong, M.M., *et al.* (2008) Fire Information for Resource Management System: Archiving and Distributing MODIS Active Fire Data. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, **47**, 72-79. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2002076>
- [51] Martone, M., Sica, F., González, C., *et al.* (2018) High-Resolution Forest Mapping from TanDEM-X Interferometric Data Exploiting Nonlocal Filtering. *Remote Sensing*, **10**, 1477. <https://doi.org/10.3390/rs10091477>
- [52] Kuželka, K. and Surový, P. (2018) Mapping Forest Structure Using UAS inside Flight Capabilities. *Sensors*, **18**, 2245. <https://doi.org/10.3390/s18072245>
- [53] 杨昆, 罗毅, 徐玉妃, 等. 基于无线传感器网络与 GIS 的蓝藻水华爆发动态监测与模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 197-205.
- [54] 李德仁. 论时空大数据的智能处理与服务[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(12): 1825-1831.